شناسایی خسارت در سازه‌ها بااستفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه MOPSO و MOEA/D*

میلاد جهانگیری[1] بهروز احمدی ندوشن[2]

چکیده *تحقیقات زیادی در تکنیک شناسایی خسارت در سازه‌ها بااستفاده از بهینه‌سازی تک‌هدفه انجام گردیده است. اخیراً، کاربرد روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه موردتوجه محققان قرار گرفته است. از این رو، در این پژوهش بااستفاده از الگوریتم‌های نوین بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه و بیان توابع هدف سختی و شکل مودی به‌منظور شناسایی خسارت در تیر دوسرساده و در تیر دوسرگیردار پرداخته شده است. نتایج حاصل از تیر دوسرگیردار با نتایج تجربی دیگر محققان مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادشده منجر به عملکرد مطلوب در موقعیت‌یابی و کیفیت‌سنجی خسارت می‌گردد.*

واژه های کلیدی شناسایی خسارت، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم تکاملی.

Structural Damage Identification Using MOPSO and MOEA/D Multi-Objective Evolutionary Optimization Algorithms

M. Jahangiri B. Ahmadi-Nedushan

Abstract *Many researchers have applied single-objective optimization algorithms for structural damage identification. Recently, multi-objective optimization algorithms have also been considered for this purpose. This article applies two recent multi-objective evolutionary optimization algorithms and modal shape and stiffness objective functions for structural damage detection in a simply supported beam and a two fixed-end moment beam. For the fixed supported beam, the results are compared with the experimental results from the literature. The results demonstrate the good performance of proposed approach in localization and quantification of damages.*

Key Words Damage Identification, Multi-Objective Optimization, Evolutionary Algorithms.

---

* تاریخ دریافت مقاله ٩٤/١٠/٣٠ و تاریخ پذیرش آن ٩٥/٩/٦ می‌باشد.

(١) فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

(٢) نویسنده مسئول: دانشیار مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه یزد. Email: behrooz.ahmadi@yazd.ac.ir

مقدمه

سازه‌ها در طول مدت زمان بهره‌برداری‌شان دچار آسیب می‌شوند. این عوامل به شکل‌های طبیعی و غیرطبیعی بر سازه اثر می‌گذارد. عوامل طبیعی از قبیل زلزله، باد و عوامل غیرطبیعی شامل انفجار، ضربه و... تأثیر مخربی برروی سازه دارند. این اثرات مخرب گاهی برروی سطح خارجی سازه ظاهر می‌شوند که ترمیم و بازسازی آن به‌وسیلهٔ بازرسی چشمی ممکن می‌باشد ولی گاهی این اثرات مخرب درون سازه رخ می‌دهد یا بنا به شرایط هندسی سازه قابل مشاهده به‌وسیلهٔ بازرسی چشمی نمی‌باشند. به‌علاوه، روش بازرسی چشمی برای ارزیابی شدت خسارت، ظرفیت محدودی دارد. بنابراین در چنین حالاتی تشخیص محل خسارت و همچنین شدت آسیب واردشده به سازه امری دشوار است و نیاز به انجام مطالعات گسترده و آزمایش‌های مهندسی دارد. لذا، بااستفاده از روش‌های شناسایی و ارزیابی خسارت در سازه می‌توان محل و شدت آسیب را شناسایی کرد. درنهایت می‌توان با بازسازی و ترمیم خسارت واردشده، طول عمر مفید ساختمان را افزایش داد. به‌عنوان مثال می‌توان به حدود چهل درصد از زیرساخت‌های کشور آمریکا از قبیل پل‌ها، سدها، راه‌آهن‌ها، مراکز عمومی، بیمارستان‌ها، ادارات، مدارس و غیره اشاره نمود، که ازلحاظ سازه‌ای دچار خسارت شده‌اند و نیاز به مقاوم‌سازی و ایمن‌سازی دارند [1]. در سال ۱۹۷۵، برای اولین بار توسط هولاند تابع هدفی براساس فرکانس طبیعی برای شناسایی خسارت در سازه بیان شد و بااستفاده از روش الگوریتم ژنتیک به‌صورت تابع تک‌هدفه به بهینه‌سازی آن پرداخته شد [2]. در سال‌های بعد استفاده از اشکال مودی برای شناسایی خسارت مطرح گردید که کاربرد آن به‌صورت تعریف معیار اطمینان مودال (MAC) مطرح شد [3]. همچنین پاندی و بیسواز در سال ۱۹۹٤ معیار نرمی مودال را برای تشخیص آسیب در سازه مورد تحلیل قرار دادند [4]. سپس لیمیتره در سال ۱۹۹٦ معیار جدیدی برای شناسایی خسارت معرفی کرد که این معیار براساس انرژی کرنشی و معادلهٔ مقدار ویژه بیان گردید [5]. سالاو در سال ۱۹۹۷ تابع تک‌هدفهٔ تغییرات فرکانس طبیعی سازه را بررسی کرد [6]. معیار اطمینان مودال (MAC) که توسط اوینز در سال ۱۹۸٤ ارائه شده بود برای یک مود ارتعاش از سازه کاربرد داشت و درنهایت گوا و اسپنسر در سال ۲۰۰۲ در همین راستا معیاری به نام معیار اطمینان مودال کلی (TMAC) را ارائه کردند که برای تمامی مودهای ارتعاش سازه قابل‌استفاده بود و درنهایت پررا و همکاران در سال ۲۰۱۱ معیار اطمینان مودال کلی را مورد بازبینی قرار دادند و معیار اطمینان مودال کلی اصلاح‌شده (MTMAC) را پیشنهاد کردند [7,8]. یی و لیو در سال ۲۰۰۱، درصدد بررسی عملکرد توابع چندهدفه براساس پارامترهای مودال برآمدند که با تعریف دو تابع تک‌هدفه شروع شد و به‌طورکلی تحقیقات خود را برروی توابع چندهدفه و کاربرد این توابع برای شناسایی آسیب در سازه‌ها شروع کردند [9]. در این پژوهش سعی بر آن شده است که با بیان تابع هدف جدید و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفهٔ نوین ازدحام ذرات و الگوریتم تکاملی مبتنی بر تجزیه به مطالعه و بررسی عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سازه پرداخته شود [10-12]. درابتدا با مدل‌سازی یک تیر دوسرساده در سناریوهای خسارت یگانه و چندگانه بااستفاده از توابع هدف سختی مودی و شکل مودی و به‌کمک الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه به شناسایی و ارزیابی آسیب در این تیر پرداخته شده است. همچنین، نتایج حاصل از شناسایی و ارزیابی خسارت در مدل‌سازی تیر دوسرگیردار با نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی هیو و همکاران برای بررسی پتانسیل توابع هدف و میزان عملکرد الگوریتم‌های تکاملی MOPSO و MOEA/D مقایسه گردیده است.

فرمول‌بندی مسئلهٔ تشخیص آسیب در سازه‌ها معادلهٔ مقدار ویژه

معادلهٔ مقدار ویژهٔ سازه که در حل مسائل مهندسی و آنالیز مودال سیستم‌های سازه‌ای نقش بسزایی دارد، در دو حالتِ ۱) معادلهٔ مقدار ویژهٔ سازه در حالت سالم و

۲) معادلهٔ مقدار ویژهٔ سازه در حالت آسیب‌دیده، موردتوجه قرار می‌گیرد. معادلهٔ مقدار ویژهٔ سازه در حالت سالم و آسیب‌دیده به فرم زیر بیان می‌گردد:

$$\left([K^h]-(\omega_i^h)^2.[M]\right).\{\phi_i^h\}=0\,;(i=1,2,3,\dots,NM) \quad (۱)$$

$$\left([K^d]-(\omega_i^d)^2.[M]\right).\{\phi_i^d\}=0\,;(i=1,2,3,\dots,NM) \quad (۲)$$

که در اینجا NM تعداد مودهای ارتعاش سازه است. ماتریس جرم در هر دو رابطه بدون اندیس می‌باشد، زیرا در هر دو معادله ماتریس جرم ثابت است. این فرض براساس مطالعات آزمایشگاهی می‌باشد، ماتریس جرم قبل و بعد از آسیب بدون تغییر باقی می‌ماند و در این پژوهش تغییرات آن تابعی از خسارت اعمال‌شده به سازه نیست. در اینجا اندیس‌های h، d و i به‌ترتیب نمادهای سازهٔ سالم، سازهٔ آسیب‌دیده و شمارهٔ مود ارتعاش سازه می‌باشند [13].

شاخص خسارت سازه

احتمال وقوع انواع خسارت در سازه وجود دارد. گاهی اوقات به‌دلیل اجرای بد سازه از قبیل جوشکاری نامناسب، ترک‌خوردگی بتن ممکن است سازه دچار آسیب گردد. باتوجه به مطالعات انجام‌شده، این خسارت‌ها به‌طور مستقیم بر دو پارامتر سازه تأثیر می‌گذارد. خساراتی که باعث تغییر در مشخصات هندسی سازه می‌گردد منجر به تغییر ممان اینرسی می‌شود و خساراتی که در فیزیک و مکانیک سازه تأثیر می‌گذارد باعث تغییر مدول الاستیک سازه می‌گردد. تغییر هرکدام از این دو پارامتر باعث تغییر در ماتریس سختی المان و درنهایت ماتریس سختی کل سازه می‌گردد. برای محاسبهٔ ماتریس المان نیاز به تعریف شاخص خسارت المان می‌باشد. این شاخص خسارت، براساس مشخصات هندسی سازه (ممان اینرسی) و مشخصات مکانیکی سازه (مدول الاستیک) تعریف می‌گردد. شاخص مذکور میزان خسارت اعمال‌شده به هر المان را بیان می‌کند. این شاخص که ضریب مؤثری برای خسارت ماتریس سختی المان است، به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$d_{e_i}=1-\frac{(EI)_i^d}{(EI)_i^h}\;;\;(i=1,2,3,\dots,NE) \quad (۳)$$

که در اینجا NE تعداد المان سازه می‌باشد. این شاخص همواره بین ۰ و ۱ می‌باشد. صفر به‌معنای سالم بودن المان در سازه و یک به‌معنای زوال کامل المان در سازه می‌باشد [14].

سختی المان آسیب‌دیده

اکنون برای محاسبهٔ ماتریس سختی المان آسیب‌دیده براساس علم مکانیک محیط‌های پیوسته خواهیم داشت:

$$\left[K_{e_i}^d\right]=\left(1-d_{e_i}\right).[K_{e_i}^h] \quad (٤)$$

در این رابطه $[K_{e_i}^h]$ و $\left[K_{e_i}^d\right]$ به‌ترتیب ماتریس سختی المان i ام در حالت‌های سازه سالم و آسیب‌دیده می‌باشد [15,16].

فرمول‌بندی مسئلهٔ بهینه‌سازی چندهدفه

معیار اطمینان مودال

معیار اطمینان مودال برای اولین‌بار توسط آلمانگ و برون برای استفاده در آنالیز مودال مطرح گردید. این معیار توسط محققان بسیاری مورداستفاده قرارگرفته است. این معیار برای مشخص نمودن میزان هم‌بستگی بین دو بردار می‌باشد. معیار اطمینان مودال که در هر دو تابع هدف مورداستفاده قرارگرفته است در حقیقت یک معیار مبدل به بازهٔ ۰ و ۱ می‌باشد و برای نشان دادن رابطهٔ هر دو بردار دل‌خواه قابل کاربرد است (مقدار آن همواره بین ۰ و ۱ می‌باشد). در علم آمار می‌توان به نام ضریب هم‌بستگی از این معیار نام برد. در حالتی که مقدار آن برابر صفر باشد نشان‌دهندهٔ عدم ارتباط بین دو بردار می‌باشد به‌عبارت‌دیگر هیچ‌گونه هم‌بستگی بین دو بردار وجود ندارد و در حالتی که مقدار آن یک باشد

بدان معناست که دو بردار کاملاً به یکدیگر هم‌بستگی دارند و مستقل نیستند و بردار تغییر نکرده است. معیار MAC برای دو بردار دل‌خواه x , y به شرح زیر تعریف می‌گردد [17]:

$$MAC = \frac{\left|\{x\}^{T}\{y\}\right|^{2}}{(\{x\}^{T}\{x\})(\{y\}^{T}\{y\})} \quad (٥)$$

معیار اطمینان مودال براساس سختی مودی

تابع هدف اول بااستفاده از معیار اطمینان مودال و براساس سختی مودال تعریف شده است. ازآنجاکه سختی سازه بعد از خسارت کاهش می‌یابد و جرم هم ثابت می‌باشد، بنابراین کاهش فرکانس طبیعی سازه یک امر بدیهی تلقی می‌گردد. به‌همین‌خاطر، نکتهٔ بسیار کلیدی در رابطهٔ ماتریس سختی مودال در مورد ضریب فرکانس طبیعی می‌باشد که روند کاهشی آن ما را در کاهش ماتریس سختی مودال یاری می‌نماید و درزمینهٔ بهینه‌سازی تابع هدف برای هم‌گرایی و سوق به جواب مطلوب بسیار مناسب می‌باشد. از طرف دیگر، تغییرات ضریب جرم مودال با تغییرات تابع هدف هم‌سو می‌باشد و مشکلات تغییرات کوچک در فرکانس طبیعی سازه را جبران می‌نماید. درحقیقت جرم مودال سازه بعد از آسیب در سازه افزایش می‌یابد و این افزایش منجر به کاهش بیشتر ماتریس سختی مودال می‌گردد و باعث افزایش حساسیت ماتریس سختی مودال نسبت به خسارت می‌گردد [8].

$$[K] = [\Phi]^{-T}.[\Lambda].[\widetilde{M}].[\Phi]^{-1} \quad (٦)$$

$$[K] = [M].[\Phi].[\widetilde{M}]^{-1}.[\Lambda].[\Phi]^{T}.[M] \quad (٧)$$

$$[K]_{i} = \frac{\omega_{i}^{2}}{M_{i}}.[M].\{\Phi_{i}\}.\{\Phi_{i}\}^{T}.[M]\ ;\ (i = 1,2,3,\dots,NM) \quad (٨)$$

$$[K] = \sum_{i=1}^{NM}\frac{\omega_{i}^{2}}{M_{i}}.[M].\{\Phi_{i}\}.\{\Phi_{i}\}^{T}.[M] \quad (٩)$$

اکنون‌که ماتریس جرم مودال برای هر مود در دو حالت سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب‌دیده محاسبه می‌گردد، درایه‌های بردار جرم مودال همان درایه‌های قطر اصلی ماتریس جرم مودال در هر مود برای هر دو حالت سالم و آسیب‌دیده می‌باشد. سختی به‌معنای میزان نیرو به‌ازای جابه‌جایی واحد می‌باشد و ماتریس سختی مودال هم به‌معنای سختی سازهٔ تغییرشکل‌یافته تحت الگوی هر مد شکل می‌باشد. هر ستون از ماتریس سختی مودی به‌معنای ایجاد یک جابه‌جایی واحد در درجهٔ آزادی متناظر با همان ستون می‌باشد. اکنون درایه‌های این ستون میزان نیرو در تمامی درجات آزادی تحت شرایط ایجادشده می‌باشد. ازاین‌رو، قطر اصلی ماتریس سختی مودال درحقیقت نسبت به خسارت ایجاد شده بسیار حساس‌تر از دیگر عناصر است و میزان نیرو در همان گره جابه‌جایی واحد اعمال‌شده را نشان می‌دهد و درصورت وجود خسارت ما را بهتر آگاه می‌نماید. رابطهٔ معیار اطمینان مودال براساس سختی به فرم زیر تبیین شده است:

$$MACSTIF_{i} = \frac{\left|\{K_{health}\}_{i}^{T}.\{K_{damage}\}_{i}\right|^{2}}{(\{K_{health}\}_{i}^{T}.\{K_{health}\}_{i}) \times \left(\{K_{damage}\}_{i}^{T}.\{K_{damage}\}_{i}\right)} \quad (١٠)$$

معیار اطمینان مودال مذکور یک رابطه برای مشخص نمودن میزان هم‌بستگی بین دو بردار می‌باشد. این معیار هم‌بستگی همواره بین ۰ و ۱ است که در حالت صفر به‌معنای عدم وجود هم‌بستگی بین دو بردار می‌باشد و در حالت یک به‌معنای تطابق کامل بین دو بردار است، بنابراین هرچه مقدار این عبارت به یک نزدیک‌تر باشد به‌معنای تطابق بیشتر دو بردار می‌باشد؛ لذا معیار مذکور می‌بایست ماکزیمم گردد تا شاخص‌های خسارت به‌درستی تعیین شوند. همچنین این معیار برای یک مود از سازه قابل کاربرد است درصورتی‌که در آنالیز دینامیکی براساس آیین‌نامه حداقل سه مود اول لازم می‌باشد. محققان برای برطرف نمودن این مشکل، معیار گفته‌شده را برای هر تعداد مود دل‌خواه محاسبه کرده‌اند. براساس علم بهینه‌سازی به‌جای ماکزیمم‌سازی از فرم استاندارد برای مینیمم‌سازی استفاده‌شده است. بنابراین، تابع هدف اول

یا همان معیار اطمینان مودال براساس سختی به شکل زیر ارائه گردیده است:

$$F_1 = 1 - \prod_{i=1}^{NM} MACSTIF_i \quad (11)$$

معیار اطمینان مودال براساس شکل مودی

تابع هدف دوم بااستفاده از معیار اطمینان مودال و براساس اشکال مودی برای شناسایی خسارت مطرح گردیده است. اشکال مودی سازه، معرف الگویی از تغییرشکل سازه در هر مود ارتعاش می‌باشد. براساس مطالعات انجام‌شده، مکان و محل خسارت در تغییرات بردارهای اشکال مودی تأثیر بسزایی دارند. به‌عبارت‌دیگر با اعمال خسارت در المان‌های مختلف بردارهای اشکال مودی الگوهای تغییرشکل سازه را متفاوت نسبت به قبل گزارش می‌دهند [18]. ازاین‌رو معیار اطمینان مودال براساس شکل مودی سازه برای عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سازه گزینهٔ مطلوبی می‌باشد. این معیار براساس رابطهٔ زیر تشریح می‌گردد:

$$MACPHI_i = \frac{|\{\Phi_{health}\}_i^T \cdot \{\Phi_{damage}\}_i|^2}{(\{\Phi_{health}\}_i^T \cdot \{\Phi_{health}\}_i) \times (\{\Phi_{damage}\}_i^T \cdot \{\Phi_{damage}\}_i)} \quad (12)$$

معیار اطمینان مودال شکل مودی، رابطه‌ای برای مشخص نمودن میزان هم‌بستگی دو بردار شکل مودی سازهٔ سالم و آسیب‌دیده می‌باشد. این معیار نرمالیزه‌کننده که همواره بین ۰ و ۱ است در این تابع هدف درصورتی دارای مقدار صفر است که هیچ‌گونه هم‌بستگی بین بردارهای اشکال مودی عددی و آزمایشگاهی نباشد. به‌عبارت‌دیگر مقدار صفر مبین تخریب و آسیب جدی در سازه می‌باشد و در صورتی این مقدار برابر یک می‌باشد که سازه کاملاً سالم باشد و هیچ‌گونه آسیبی ندیده باشد. بردارهای عددی، بردارهای سازه در حالت سالم و پر از عدد می‌باشند درحالی‌که بردارهای تجربی، بردارهای سازه در حالت آسیب‌دیده و شامل عدد و متغیرهای شاخص خسارت می‌باشد.

علت ماکزیمم‌سازی معیارهای اطمینان مودال سختی و شکل مودی بدان دلیل است که درحقیقت هم‌بستگی دو بردار را به بیشینه مقدار برسد، به‌عبارت‌دیگر، هنگامی معیارهای مذکور به‌عنوان توابع هدف اول و دوم به‌صورت هم‌زمان بهینه می‌گرداند که معیارهای اطمینان مودالشان ماکزیمم گردد و این درصورتی امکان‌پذیر است که شاخص‌های خسارت در المان‌های آسیب‌دیده به‌درستی محاسبه و پیش‌بینی گردد. علت اصلی این امر آن است که فرکانس‌های طبیعی سازه در هر دو حالت متفاوت می‌باشد و فرکانس‌های طبیعی آزمایشگاهی که کوچک‌تر از فرکانس‌های طبیعی عددی هستند هنگامی اجازهٔ ماکزیمم‌سازی به معیار مذکور را می‌دهد که شاخص‌های خسارت به‌درستی تعیین گردد. از سویی دیگر تمامی محاسبات و بهینه‌سازی با عنایت به رعایت قیود مسئله و بازهٔ تغییرات شاخص‌های خسارت و معیارهای مودال می‌باشد. مشکلات ارائه‌شده در تابع هدف اول از قبیل توانایی‌های کاربرد برای یک مود و غیراستاندارد بودن فرم بهینه‌سازی برای تابع هدف دوم هم وجود دارد. بنابراین رابطهٔ تابع هدف دوم یا همان معیار اطمینان مودال براساس شکل مودی به فرم زیر ارائه می‌گردد:

$$F_2 = 1 - \prod_{i=1}^{NM} MACPHI_i \quad (13)$$

متغیرهای طراحی و قیود مسئله

به‌طورکلی فرمول‌بندی ریاضی مسئلهٔ شناسایی خسارت چندهدفه به شرح زیر بیان می‌گردد:

در این رابطه بردار شاخص خسارت $\{d_{e_i}\}$، مقادیر خسارت هر المان را نشان می‌دهد.

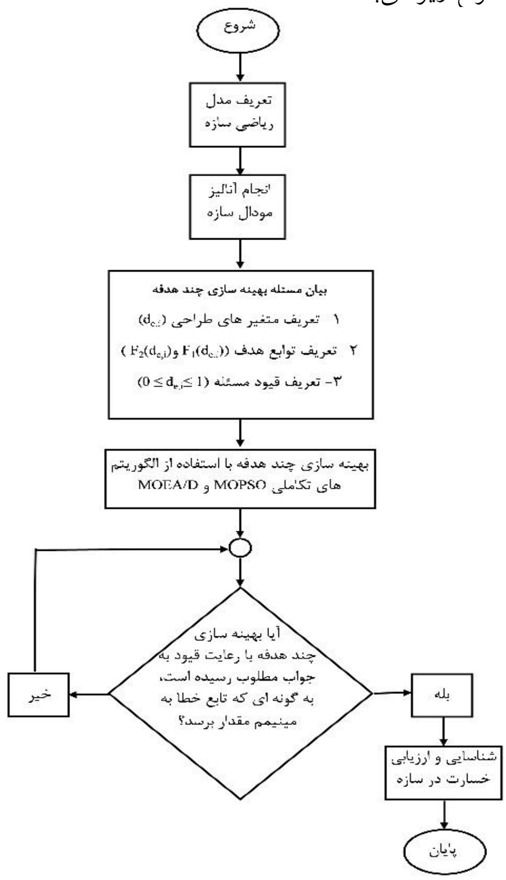
$$[F_{Multiple}(\{d_{e_i}\})] = [F_1(\{d_{e_i}\}), F_2(\{d_{e_i}\}), \ldots, F_m(\{d_{e_i}\})] \quad (14)$$

به‌علاوه مقادیر شاخص خسارت هر المان محصورشده در بازهٔ ۰ و ۱ می‌باشد؛ لذا، قیود مسئلهٔ شناسایی خسارت در این محدوده بیان می‌گردند [8].

$$0 < d_{e_i} < 1\,;\;\; (i = 1,2,3,\dots,NE) \qquad (۱۵)$$

$$\{d_{e_i}\} = [d_{e_1}, d_{e_2}, \dots, d_{e_{NE}}] \qquad (۱٦)$$

بنابراین، فلوچارت کلی تشخیص آسیب در سازه به شرح زیر می‌باشد:

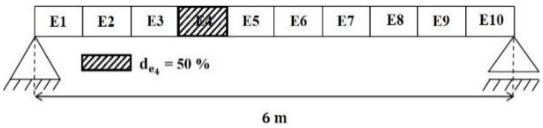


شکل ۱ فلوچارت تشخیص آسیب در سازه

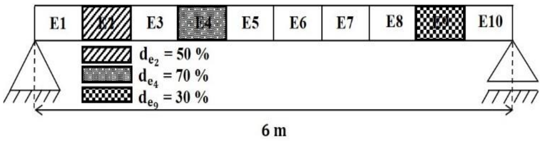
مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی

مدل‌سازی عددی تیر دوسرساده

در این پژوهش یک تیر دوسرساده تحت اعمال سناریوی خسارت تک‌هدفه و چندهدفه مدل‌سازی گردید. به‌طورکلی سه نوع سناریو برای اعمال به سازه وجود دارد. نوع اول آن سناریوی خسارت یگانه نام دارد و تنها یک المان دچار آسیب می‌گردد. نوع دوم آن سناریوی خسارت چندگانه نام دارد که چندین المان دچار آسیب می‌گردند. مشخصات مکانیکی و هندسی سازه به‌شرح زیر می‌باشد:



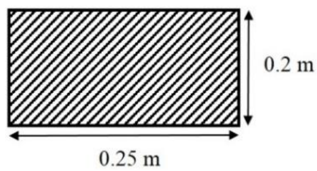
شکل ۲ سناریوی خسارت یگانه



شکل ۳ سناریوی خسارت چندگانه

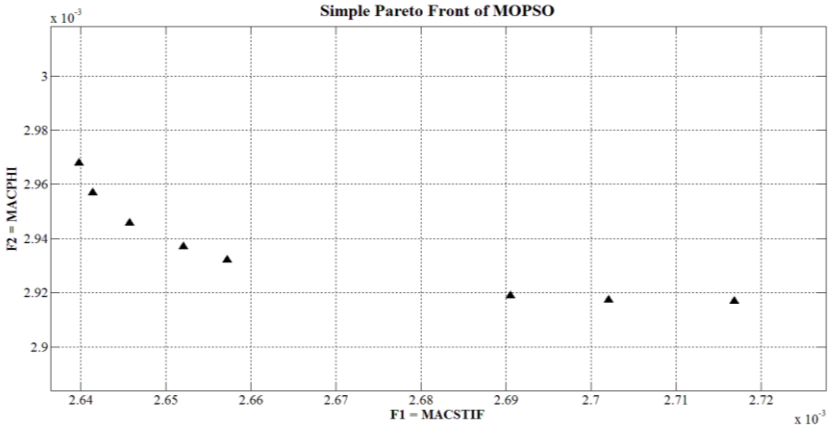
جدول ۱ مشخصات هندسی و خواص مکانیکی مدل

طول تیر	L	m ٦
پهنای مقطع عرضی	b	m ۰/۲۵
ارتفاع مقطع عرضی	h	m ۰/۲
مساحت مقطع عرضی	A	m^2 ۰/۰۵۰
چگالی مصالح	ρ	kg/m^3 ۲۵۰۰
مدول الاستیک	E	N/m^2 ۳۲ * ۱۰^{۹}
ممان اینرسی	I	(*b*h^{3}۱/۱۲)
طول المان	L_e	m ۰/٦

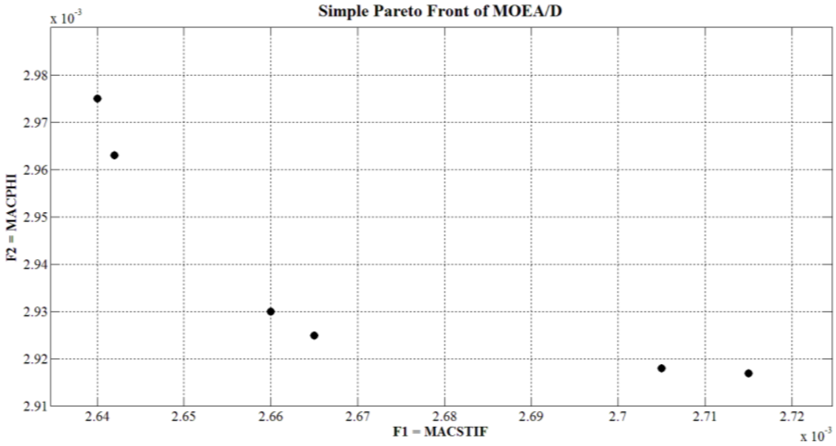


شکل ٤ مقطع عرضی مدل تیر دو سر ساده

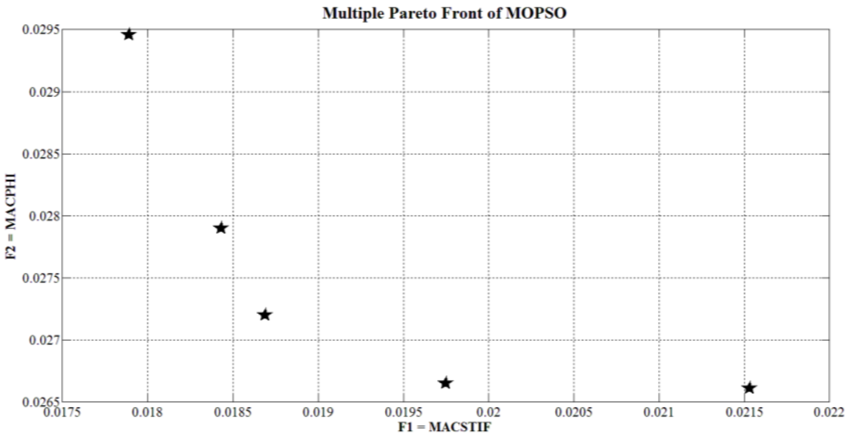
بهینه‌سازی چندهدفه بااستفاده از الگوریتم‌های چندهدفهٔ ازدحام ذرات و الگوریتم تکاملی مبتنی بر تجزیه و با نرم‌افزار متلب انجام گردید. در الگوریتم‌های مذکور اندازهٔ جمعیت اولیه ۵۰ درنظر گرفته شد. مدت‌زمان اجرای برنامهٔ بهینه‌سازی چندهدفه در یک سیستم پنتیمم ۱/۷۳ هرتز و با حافظهٔ ۱ گیگا بایت برای هر دو الگوریتم حدود ۱۱ هزار ثانیه به‌طول انجامید. نمودارهای بهینهٔ جبههٔ پارتو برای هر دو سناریوی خسارت یگانه و چندگانه برای هر دو الگوریتم به‌شرح ذیل گزارش می‌گردد:



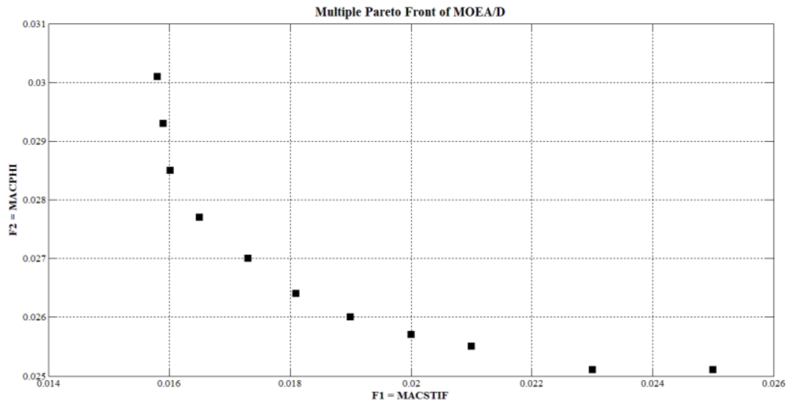
شکل ٥ نمودار بهینهٔ جبهه پارتو در سناریوی خسارت یگانه بااستفاده از الگوریتم MOPSO



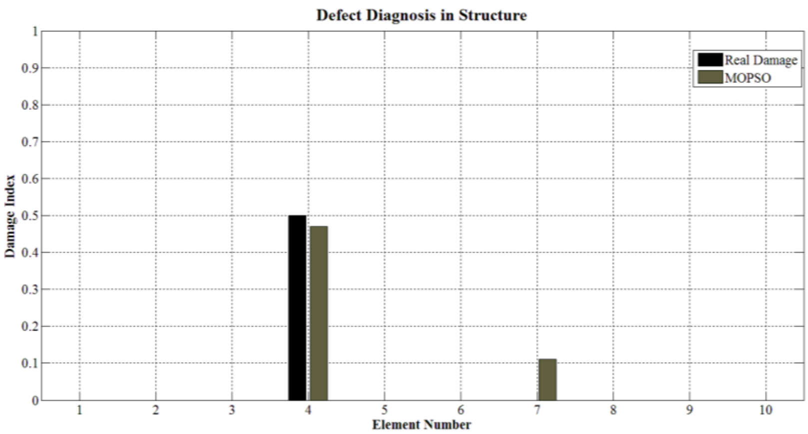
شکل ٦ نمودار بهینهٔ جبهه پارتو در سناریوی خسارت یگانه بااستفاده از الگوریتم MOEA/D



شکل ٧ نمودار بهینهٔ جبهه پارتو در سناریوی خسارت چندگانه بااستفاده از الگوریتم MOPSO



شکل ۸ نمودار بهینهٔ جبهه پارتو در سناریوی خسارت چندگانه بااستفاده از الگوریتم MOEA/D

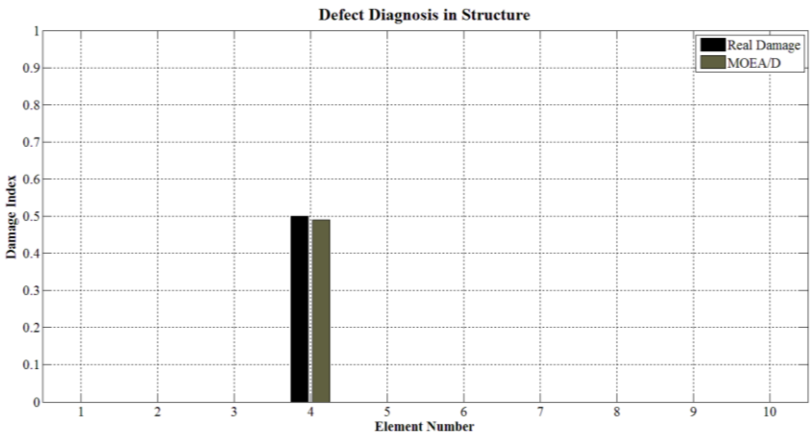


شکل ۹ عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سناریوی خسارت یگانه بااستفاده از الگوریتم MOPSO

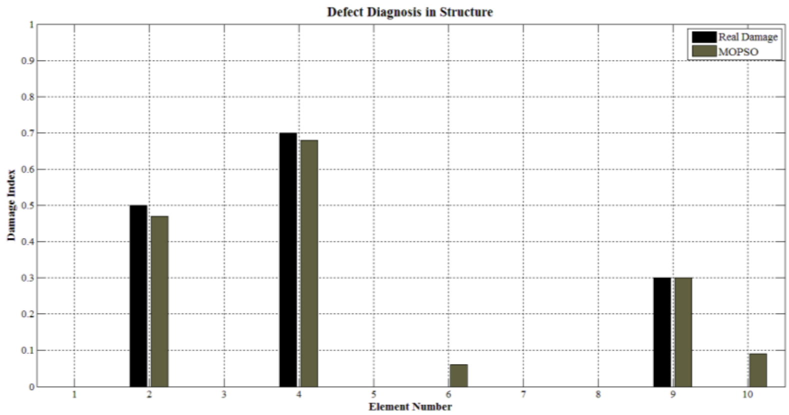
هرکدام از نقاط روی نمودار پارتو خود یک دسته جواب برای شاخص‌های خسارت المان‌های سازه را ارائه می‌دهد. یکی از معیارهای معرفی‌شده برای پایش وضعیت سازه همان تابع اختلاف یا تابع خطا در محاسبات می‌باشد. درحقیقت، در سناریوهای خسارت اعمال‌شده به سازهٔ مدل‌سازی‌شده شاخص‌های خسارت واقعی را داریم. شاخص‌های خسارت به‌دست‌آمده از روی نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو را می‌بایست با شاخص‌های خسارت واقعی مقایسه نمود. این مقایسه به‌روش خطای مجموع مربعات بین این داده‌ها صورت می‌گیرد و از بین مقدارهای به‌دست‌آمده، کوچک‌ترین جواب همان گزینهٔ مطلوب یا جواب مناسب برای پیش‌بینی خسارت در سازه می‌باشد. رابطهٔ تابع اختلاف یا تابع خطا در محاسبات به شکل زیر فرمول‌بندی گردیده است:

$$\mathrm{D.F.} = \sqrt{\sum_{i=1}^{NE} \left(d_{e_i}^{num.} - d_{e_i}^{real}\right)^2} \qquad (۱۷)$$

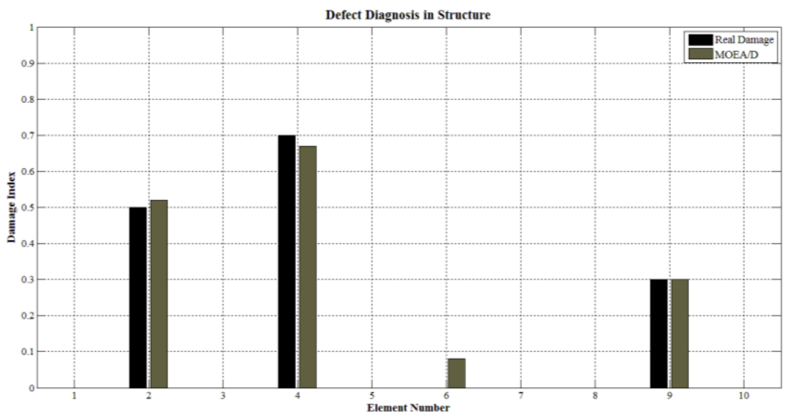
محاسبات و تحلیل برای پیش‌بینی و تخمین خسارت در سازهٔ مدل‌شده بااستفاده از هر دو الگوریتم صورت گرفته است و نتایج حاصل در نمودارهای زیر مشخص می‌باشد. نکتهٔ کلیدی که در تخمین آسیب در سازه‌ها وجود دارد، ارتباط بین گره در المان‌های مجاور هم می‌باشد. المان‌های در نزدیکی و مجاورت المان آسیب‌دیده دارای گره مشترک می‌باشند و شاخص خسارت المان آسیب‌دیده هنگام تشکیل ماتریس سختی کل بر المان‌های مجاور تأثیر می‌گذارد و خطاهای کوچک اطراف این المان‌ها قابل‌اغماض می‌باشد.



شکل ۱۰ عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سناریوی خسارت یگانه بااستفاده از الگوریتم MOEA/D



شکل ۱۱ عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سناریوی خسارت چندگانه بااستفاده از الگوریتم MOPSO



شکل ۱۲ عیب‌یابی و تشخیص آسیب در سناریوی خسارت چندگانه بااستفاده از الگوریتم MOEA/D

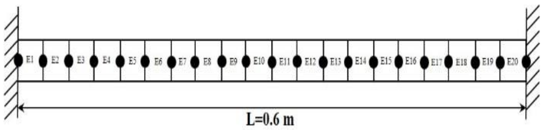
مدل‌سازی آزمایشگاهی تیر دوسرگیردار

معرفی مدل تیر دوسرگیردار. در این پژوهش مدل‌سازی تجربی هیو و همکاران به‌صورت عددی در نرم‌افزار متلب مدل شد و نتایج حاصل از تشخیص آسیب در سازه که به‌شکل یک سناریوی اعمال خسارت انجام‌شده است، در پایان گزارش گردید. این دسته از داده‌ها برای اعتبارسنجی پژوهش‌های تئوری و براساس نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی دیگر محققان

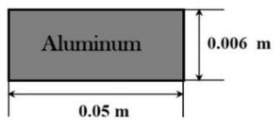
صورت می‌گیرد. هیو و همکاران در سال ۲۰۰۰ پژوهشی برای شناسایی خسارت برروی یک سازه انجام دادند. جزئیات مدل‌سازی به شرح زیر می‌باشد: یک تیر دوسرگیردار به طول ۶۰ سانتی‌متر که به ۲۰ المان تقسیم‌بندی شده است، جنس مصالح (مواد) آلومینیوم می‌باشد که مدول الاستیک آن E=70 Gpa و ضریب پواسون آن v=0.3 و چگالی آن برابر p=2700 kg/m3 می‌باشد. سطح مقطع مدل ارائه‌شده b×h=0.05m×0.006m می‌باشد.

جدول ۲ مشخصات هندسی و خواص مکانیکی مدل

طول تیر	L	۰/۶m
پهنای مقطع عرضی	b	۰/۰۵m
ارتفاع مقطع عرضی	h	۰/۰۰۶m
مساحت مقطع عرضی	A	۰/۰۰۰۳m^2
چگالی مصالح	ρ	۲۷۰۰kg/m^3
مدول الاستیک	E	۷۰ * ۱۰^۹ N/m^2
ممان اینرسی	I	(۱/۱۲)*b*h^3
طول المان	L_e	۰/۰۳m

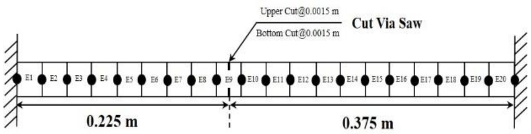


شکل ۱۳ تیر دوسرگیردار



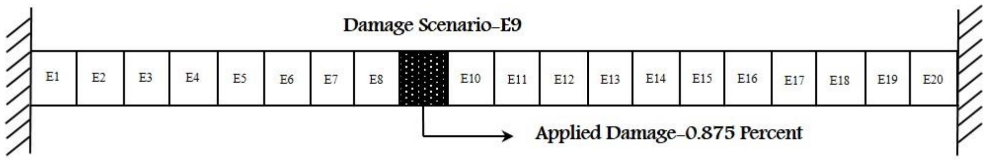
شکل ۱۴ مقطع عرضی تیر دوسرگیردار از جنس آلومینیوم

مدل‌سازی هیو و همکاران در آزمایشگاه. تیر دوسرگیردار مذکور توسط هیو و همکاران در آزمایشگاه ساخته‌شده است. خسارت اعمال‌شده به سازهٔ آزمایشگاهی به‌صورت فیزیکی و با ارّه اعمال‌شده است. در المان شمارهٔ ۹ با ارّه سطح تیر از بالا و از پایین به‌اندازهٔ یک‌چهارم مقطع بریده شده است. به‌عبارت‌دیگر نیمی از مقطع سالم مانده است و نیم دیگر مقطع از بین رفته است. همچنین مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازهٔ تیر دوسرگیردار در هر دو حالت سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب‌دیده قبل و بعد از بریدن تیر با ارّه اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه به‌وسیلهٔ دستگاه اندازه‌گیری دقیق و سنسورهای محدودی برروی گره‌های المان‌های تیر صورت گرفته است. ازاین‌رو، میزان اختلافات در فرکانس‌های طبیعی در هر دو حالت سالم و آسیب‌دیده در مدل‌سازی تئوری و تجربی امری طبیعی به‌نظر می‌رسد. تجهیزات دقیق اندازه‌گیری در آزمایشگاه هیو و همکاران و همچنین مدل شماتیکی از تیر دوسرگیردار آسیب‌دیده به‌وسیلهٔ ارّه با مشخصات دقیق هندسی خسارت در تصاویر زیر ارائه گردیده است [19]:



شکل ۱۵ تیر دوسرگیردار بریده‌شده با ارّه در آزمایشگاه توسط هیو و همکاران

مدل‌سازی تئوری در نرم‌افزار. تیر دوسرگیردار ساخته‌شده در آزمایشگاه در نرم‌افزار متلب مدل گردیده است. مشخصات تیر مدل‌سازی‌شده دقیقاً همانند مشخصات تیر فوق‌الذکر می‌باشد. در این پژوهش، بر تیر دوسرگیردار مدل‌سازی شده در المان شمارهٔ ۹ خسارتی به‌میزان ۰/۸۷۵ درصد اعمال گردیده است. طول هر المان ۰/۰۳ متر می‌باشد و دارای ۲۰ المان و ۲۱ گره است. در این سازه در هر گره دو درجه آزادی درنظر گرفته‌شده است و درنهایت ماتریس سختی سازه با اعمال خسارت در المان ۹ محاسبه گردیده است.



شکل ۱٦ تیر دوسرگیردار با اعمال سناریوی خسارت

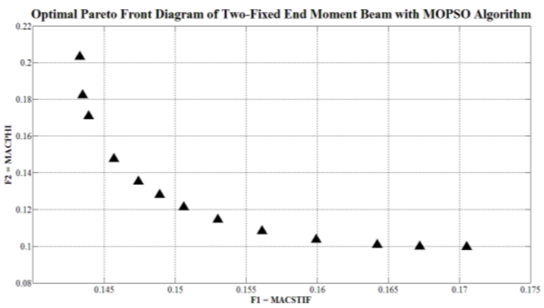
جدول ۳ نتایج فرکانس‌های سازه برای تیر دوسرگیردار

	تحقیق حاضر				هیو و همکاران [۱۹]			
	آزمایشگاهی		عددی		آزمایشگاهی		عددی	
	خسارت‌دیده	سالم	خسارت‌دیده	سالم	خسارت‌دیده	سالم	خسارت‌دیده	سالم
مود اول	–	–	۷۵/۷۷۸	۸۷/۲۳۲	۸۳/۹۸٤	۸۵/۷۲٦	۷٤/۷۱۰	۸۵/۹٦۹
مود دوم	–	–	۲۲٦/۹۷۵	۲٤۰/٤٦۱	۲۳۵/۷۹۲	۲۳۸/۵۷۲	۲۲۳/۷٦۰	۲۳٦/٦۵۷
مود سوم	–	–	٤۳۲/۳٦۰	٤۷۱/٤۲۳	٤٦۲/۷۱۲	٤٦۷/٦۹٤	٤۲٦/۱٤٦	٤٦۲/۹۷۷

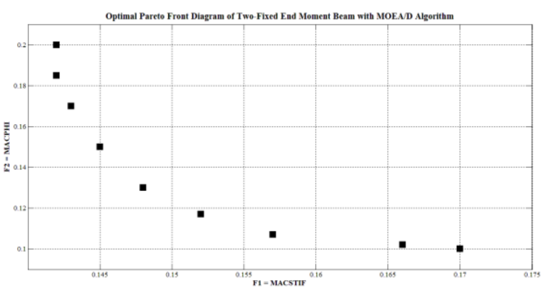
تحلیل مودال سیستم. نتایج حاصل از تحقیق هیو و همکاران در قسمت سازهٔ سالم بسیار مطلوب ارزیابی می‌گردد و نتایج بسیار به‌هم نزدیک می‌باشد. اگرچه نتایج در قسمت سازهٔ آسیب‌دیده کمی اختلاف دارد، اما قابل‌قبول می‌باشد زیرا مشاهدهٔ چنین اختلافاتی به‌دلیل خطاهای آزمایشگاهی از قبیل عدم گیرداری کافی در تکیه‌گاه‌ها، عدم اعمال صحیح آسیب به سازه، عدم استفاده از سنسور به تعداد کافی برای افزایش دقت در اندازه‌گیری فرکانس در هر دو حالت سالم و آسیب‌دیده و دیگر خطاهای موجود می‌باشد.

نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو. نکته کلیدی که در زمینهٔ نمودار بهینهٔ پارتو برای انتخاب گزینهٔ مطلوب وجود دارد درمورد انتخاب یک جواب مناسب از بین یک دسته جواب بهینه می‌باشد. در این تحقیق از معیار خطا در محاسبات برای انتخاب گزینهٔ مطلوب از میان دسته‌جواب ارائه‌شده در نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو استفاده شده است.

در نمودارهای بهینهٔ جبهه‌پارتو به‌ترتیب نقاط با مختصات‌های ۰/۱۲۸ و ۰/۱٤۸ برای تیر دوسرگیردار بااستفاده از الگوریتم MOPSO و ۰/۱۲۹ و ۰/۱٤۷ برای تیر دوسرگیردار بااستفاده از الگوریتم MOEA/D برای شناسایی و ارزیابی خسارت در سیستم اعمال گردیده‌اند.

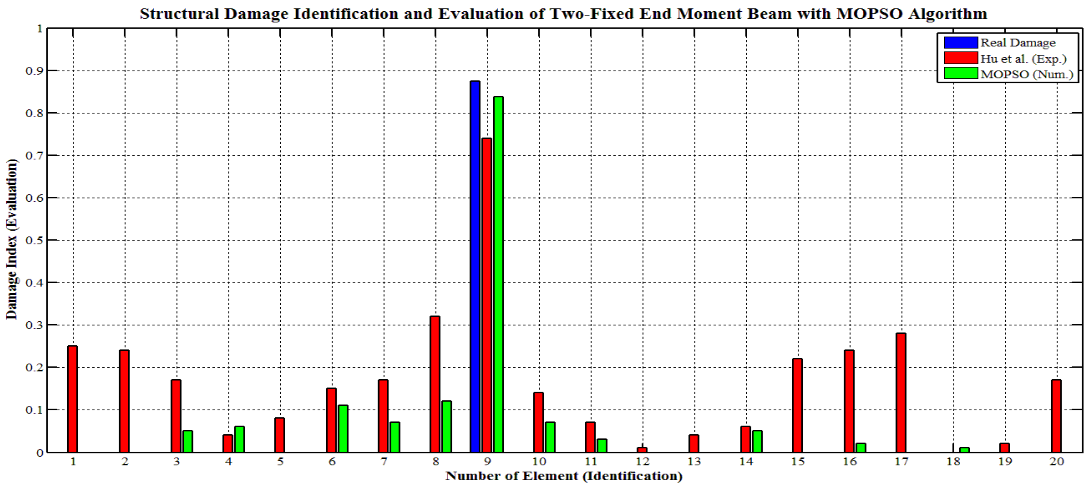


شکل ۱۷ نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو برای تیر دوسرگیردار بااستفاده از الگوریتم MOPSO

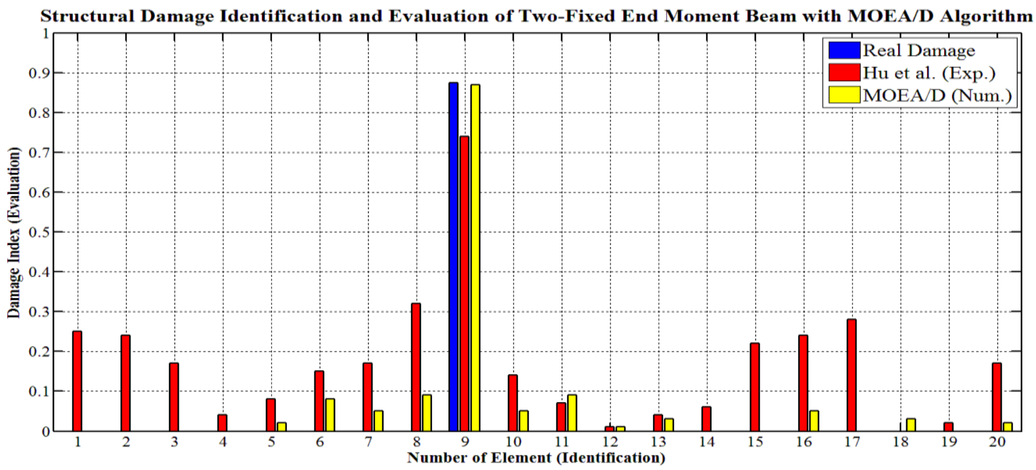


شکل ۱۸ نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو برای تیر دوسرگیردار بااستفاده از الگوریتم MOEA/D

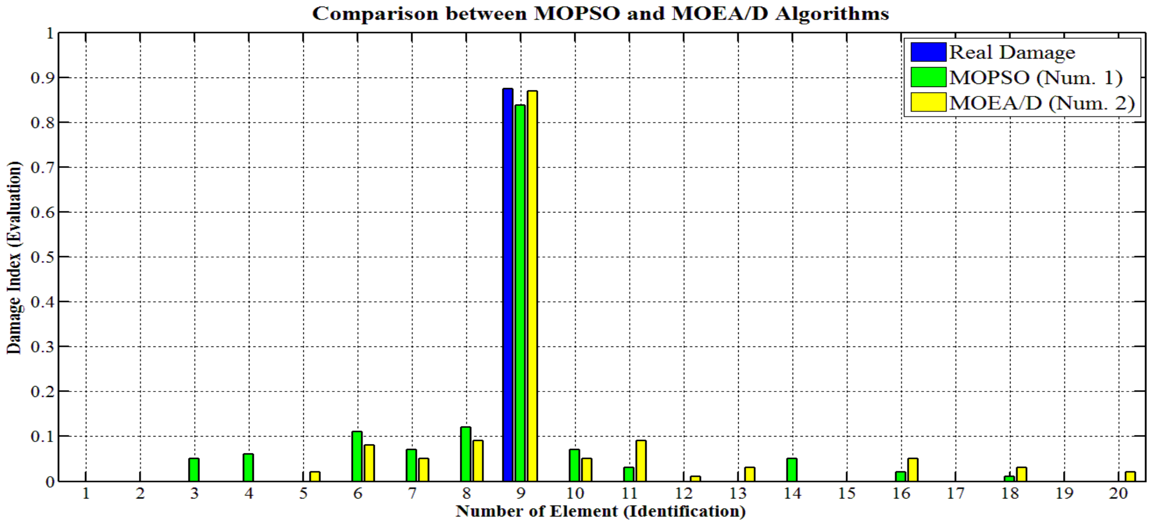
شناسایی و ارزیابی خسارت در سازه. بااستفاده از نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو به بررسی خسارت در تیر دوسرگیردار پرداخته شد. محور افقی نمودار تشخیص آسیب نشان‌دهندهٔ شمارهٔ المان می‌باشد و محور قائم نمودار بیانگر میزان شاخص خسارت در هر المان می‌باشد. باتوجه به مطالعات صورت‌گرفته در این تحقیق، به‌نظر می‌رسد نتایج حاصل از این پژوهش که براساس الگوریتم‌های ازدحام ذرات چندهدفه و الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر تجزیه بوده است، نتایج مطلوب‌تری را گزارش می‌کند. وجود خطاهای کوچک مجاور المان شمارهٔ ۹ بدیهی می‌باشد، زیرا هنگام تشکیل ماتریس سختی کل سازه المان‌های ۸ و ۱۰ از سناریوی خسارت تأثیر می‌پذیرند و تغییر می‌کنند. نتایج حاصل از پژوهش هیو و همکاران با نتایج حاصل در این تحقیق مقایسه گردیده است:



شکل ۱۹ مقایسهٔ نمودارهای شناسایی و ارزیابی خسارت در سازهٔ تیر دوسرگیردار هیو و همکاران با روش الگوریتم چندهدفهٔ ازدحام ذرات MOPSO



شکل ۲۰ مقایسهٔ نمودارهای شناسایی و ارزیابی خسارت در سازهٔ تیر دوسرگیردار هیو و همکاران با روش الگوریتم تکاملی چندهدفهٔ مبتنی بر تجزیه MOEA/D



شکل ۲۱ مقایسهٔ نمودارهای شناسایی و ارزیابی خسارت در سازهٔ تیر دوسرگیردار بااستفاده از الگوریتم چندهدفهٔ ازدحام ذرات MOPSO و الگوریتم تکاملی چندهدفهٔ مبتنی بر تجزیه MOEA/D

نتیجه‌گیری

۱- شناسایی خسارت در این پژوهش براساس دو رویکرد الف) تشخیص محل آسیب و ب) بررسی شدت آسیب دنبال گردیده است. شناسایی موقعیت هندسی خسارت و ارزیابی شدت خسارت در هر المان نیاز به دو تابع هدف قدرتمند برای عیب‌یابی دارد. ازاین‌رو، بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور تشخیص آسیب در سازه گزینه مطلوبی تلقی می‌گردد.

۲- تغییرات فرکانس طبیعی سازه تأثیر بسزایی در واکنش معیار اطمینان مودال براساس سختی مودی دارد؛ زیرا تغییرات فرکانس طبیعی به‌صورت جمع مودی مربعات در این تابع هدف تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تابع هدف اول تابعی حساس نسبت به شدت خسارت در سازه ارزیابی می‌گردد.

۳- مکان آسیب در سازه در مقادیر بردارهای شکل مودی تأثیر بسیار زیادی دارد. به‌عبارت‌دیگر، معیار اطمینان مودال براساس شکل مودی نسبت به محل آسیب‌دیدگی عکس‌العمل نشان می‌دهد. بنابراین، تابع هدف دوم تابعی مطلوب برای تشخیص موقعیت هندسی آسیب در سازه می‌باشد.

٤- مدت‌زمان اجرای الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفهٔ ازدحام ذرات برای ترسیم نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو برای هر تکرار حدود ۵۰ ثانیه به‌طول انجامیده است، درحالی‌که مدت‌زمان اجرای الگوریتم تکاملی چندهدفهٔ مبتنی بر تجزیه برای ترسیم نمودار بهینهٔ جبهه‌پارتو برای هر تکرار حدود ٤۰ ثانیه به‌طول انجامیده است. اگرچه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفهٔ مورداستفاده در این پژوهش دارای نرخ رشد همگرایی مناسبی می‌باشند، ولی الگوریتم تکاملی چندهدفه مبتنی بر تجزیه دارای عملکرد بهتری ازنظر سرعت و دقت نسبت به الگوریتم تکاملی چندهدفهٔ ازدحام ذرات دارد.

مراجع

1. Khoshnoudiana, F., and Esfandiari, A., "Structural Damage Diagnosis Using Modal Data", *Scientia Iranica*, Vol. 18, No. 4, , PP. 853-860, (2011).
2. Holland, J., "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Cambridge (MA): MIT Press, (1975).
3. Ewins, D. J., "Modal Testing: Theory and Practice", *Research studies press*, New York, (1986).
4. Pandey, AK., and Biswas, M., "Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 169, No. 3, PP. 17, (1994).
5. Lemaitre, J., and Lippmann, H., "A Course on Damage Mechanics", Springer Berlin etc., (1996).
6. Salawu, O.S., "Detection of Structural Damage through Change in Frequency: a Review", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 19, No. 9, PP. 718-723, (1997).
7. Gao, Y., and Spencer, B. F., "Damage Localization under Ambient Vibration Using Changes in Flexibility", *Journal of Earthquake Engineering*, Vib., 1, Vol. 1, PP. 136–144, (2002).
8. Perera, R., and Fang, S. E., "Damage Identification by response surface based model updating using D-optimal design", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25, Vol. 25, PP. 717–733, (2010).
9. Weijian, Yi., and Xia, Liu., "Structural Damage Diagnosis Based on Genetic Algorithm", *Engineering mechanics*, Vol. 18, No. 2, PP. 64-71, (2001).
10. Eberhart, R., and Kennedy, J., "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory", IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 0-7803-2676-8/9, pp. 7803-2676 (1995).
11. Carlos, A., "Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization", *IEEE Transitions on Evolutionary Computation*, Vol. 8, No.3, PP. 256-279, (2004).
12. Zhang, Q., and Li, H., "MOEA/D: A Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition", *IEEE Transitions On Evolutionary Computation*, Vol. 11, No.6, PP. 712-731, (2007).
13. Hwang, H. Y., and Kim, C., "Damage Detection in Structures Using a few Frequency Response Measurement", Sound and vibration, 270, PP. 1-14, (2004).
14. Perera, R., and Torres, R., "Structural Damage Detection via Modal Data with Genetic Algorithms", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, PP. 1491-1501, (2006).
15. Perera, R., Ruiz, A., and Manzano, C., "an Evolutionary Multi-Objective Framework for Structural Damage Localization and Quantification", Engineering Structures, 22, PP. 2540–2550, (2007).
16. Majumdar, A., Matiti, D. K., and Maity, D., "Damage Assessment of Truss Structures from Changes in Natural Frequencies Using ant Colony Optimization", Applied mathematics and computation, 218, PP. 9750-9772, (2012).
17. Allemang, R. J., and Brown, D. L., "A Correlation for Modal Vector Analysis", *Proceedings of 1st*

international modal analysis conference, PP.110–6, (1982).

18. Perera, R., Ruiz, A., and Manzano, A., "Performance Assessment of Multi-Criteria Damage Identification Genetic Algorithms", *Computers and Structures*, Vol. 87, PP. 120–127, (2008).
19. Hu, N., Wang, X., Fukunaga, H., Yao, ZH., Zhang, HX., and Wu, ZS., "Damage Assessment of Structures Using Modal Test Data", *International Journal of Solids Structure*, Vol. 38, PP. 3111–26, (2000).